

การผลิตแผ่นยางฟองปลอดสารตะกั่วกำบังรังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมา

จากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมบิสมัทออกไซด์

Manufacturing of Lead-free X-ray and Gamma Ray Shielding Sponge Rubber Sheet

from Bi₂O₃ - Natural Rubber Composites

ผกามาศ ลิ้มอรุณ (Phakamat Lim-arun)* เอกชัย วิมลมาลา (Ekachai Wimolmala)**

ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ (Dr.Narongrit Sombatsompop)*** ดร.เกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง (Dr.Kiadtisak Saenboonruang)****

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุกำบังรังสีจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ที่มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติการป้องกันรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมาที่ดี โดยใช้ยางธรรมชาติเกรด STR 5L ผสมร่วมกับสารทำให้เกิดฟอง 2 ชนิด คือ เอโซไดคาร์บอนาไมด์ (Azodicarbonamide, ADC) และ ออกซีบิสเบนซีนซัลโฟนิลไฮไดรไรด์ (Oxybis (benzene sulfonyl) hydrazide, OBSH) ที่ปริมาณ 0, 8 และ 16 phr และมีการผสมสารบิสมัทออกไซด์ (Bi₂O₃) ที่ปริมาณ 0, 100, 300 และ 500 phr ผลการศึกษาพบว่า การเติมสารทำให้เกิดฟองส่งผลทำให้สมบัติการกำบังรังสี สมบัติเชิงกลโดยรวมและความหนาแน่นของวัสดุลดลง แต่เมื่อเติมสารบิสมัทออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น พบว่าวัสดุมีความสามารถในการกำบังรังสี ความหนาแน่นและมีค่าความแข็งของวัสดุสูงขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟองทั้ง 2 ชนิด พบว่า การเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด ADC ส่งผลทำให้มีสมบัติโดยรวมดีกว่าวัสดุที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ซึ่งผลงานวิจัยนี้ สามารถนำไปพัฒนาเพื่อผลิตเป็นวัสดุป้องกันรังสีส่วนบุคคลสำหรับผู้ปฏิบัติงานได้

ABSTRACT

This work aimed to develop a radiation shielding materials based on natural rubber (NR) composites that have good mechanical, physical, and X-ray/gamma ray shielding properties. This work used natural rubber (STR 5L) mixed with a blowing agent, either Azodicarbonamide (ADC) or Oxybis (benzene sulfonyl) hydrazide (OBSH) at the contents of 0, 8, 16 phr with the addition of bismuth oxide (Bi₂O₃) at contents of 0, 100, 300, 500 phr, respectively. The results indicated that the addition of blowing agents led to the reductions in X-ray/gamma shielding, overall mechanical, and density properties, while the addition of Bi₂O₃ resulted in the increases of X-ray/gamma shielding, density, and hardness properties. When comparing effects of different blowing agent's types, the results showed that the addition of ADC resulted in better overall properties than OBSH. In conclusion, the overall results indicated that the developed materials have great potential to be used as a personal radiation shielding device for personnel.

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ สารทำให้เกิดฟอง บิสมัทออกไซด์

Keywords: Natural rubber, Blowing agent, Bismuth oxide

* นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

** รองศาสตราจารย์ สาขาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

*** ศาสตราจารย์ สาขาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

**** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทนำ

รังสีแกมมาและรังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง (นคร, 2555) ซึ่งในปัจจุบันมีการนำรังสีแกมมาและรังสีเอ็กซ์ไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย ทั้งในด้านการเกษตร ด้านการวิจัย และด้านการแพทย์ เป็นต้น แต่ทั้งนี้ รังสีสามารถก่อให้เกิดโทษกับผู้ที่ได้รับรังสีในปริมาณสูงได้เช่นกัน เนื่องจากรังสีแกมมาและรังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง ทำให้สามารถทะลุทะลวงตัวกลางต่าง ๆ รวมถึงอวัยวะภายในของผู้ปฏิบัติงานได้สูง ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบการทำงานต่าง ๆ ของร่างกายได้ ดังนั้น ในการปฏิบัติงานร่วมกับรังสี ผู้ปฏิบัติงานและผู้ได้รับรังสี ต้องมีการป้องกันรังสีที่มีประสิทธิภาพ เพื่อลดความเสี่ยงในการได้รับรังสีให้น้อยลง โดยทั่วไปในงานป้องกันรังสีจะนิยมปฏิบัติตามหลักการ ALARA (As Low As Reasonably Achievable) ซึ่งเป็นหลักการในการควบคุมการได้รับรังสีในปริมาณที่น้อยที่สุด ซึ่งประกอบด้วย เวลา ระยะทาง และวัสดุกำบังรังสี กล่าวคือ การปฏิบัติงานร่วมกับรังสีหากใช้เวลากับต้นกำเนิดรังสีน้อยและผู้ปฏิบัติงานอยู่ห่างจากต้นกำเนิดรังสีมาก จะทำให้ปริมาณการได้รับรังสีลดลง นอกจากนี้การใช้วัสดุกำบังรังสีที่มีประสิทธิภาพ จะทำให้ปริมาณรังสีที่ได้รับน้อยลงเช่นกัน ทั้งนี้ องค์ประกอบทั้งสามของหลักการ ALARA ส่งผลต่อผู้ปฏิบัติการได้รับรังสีจากการใช้งานในปริมาณที่น้อยลง เป็นการเพิ่มความปลอดภัยให้กับเจ้าหน้าที่ต่าง ๆ ทั้งนี้ ในส่วนของวัสดุกำบังรังสีนั้น เป็นองค์ประกอบสำคัญที่เป็นการป้องกันรังสีในลำดับสุดท้ายก่อนที่จะผ่านมายังตัวผู้ปฏิบัติงาน โดยทั่วไป วัสดุตะกั่ว มีประสิทธิภาพในการกำบังรังสีแกมมาและรังสีเอ็กซ์ได้ดี เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีเลขมวลอะตอมและความหนาแน่นสูง (นวลณี, 2545) แต่แผ่นตะกั่วเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักที่มาก และอาจมีความเป็นพิษสะสม ซึ่งส่งผลเสียต่อร่างกาย เมื่อมีการใช้งานอย่างต่อเนื่อง อาจส่งผลทำให้เกิดความเมื่อยล้าในขณะใช้งาน และเป็นอันตรายต่ออวัยวะในร่างกายได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งมีการศึกษาวัสดุกำบังรังสีปลอดสารตะกั่ว โดยใช้ยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอีน (Ethylene-Propylene Diene Rubber, EPDM) ผสมร่วมกับโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ เพื่อทำเป็นวัสดุกำบังรังสีแทนตะกั่ว ได้แก่ เหล็ก (Iron, Fe), บิสมัท (Bismuth, Bi) และทังสเตน (Tungsten, W) พบว่าสารบิสมัทออกไซด์สามารถป้องกันรังสีได้ดีที่สุด เนื่องจากเป็น Bi เป็นธาตุที่มีเลขอะตอมและความหนาแน่นสูงใกล้เคียงกับตะกั่วและสูงที่สุดในโลหะออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัย (Poltabtim et al., 2018) และ Gwaily (2002) ศึกษาผลของการกำบังรังสีของแร่ตะกั่ว (Galena) ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) และยางสไตรีน-บิวทาไดอีน (Styrene-butadiene rubber, SBR) พบว่า การเติมสาร Galena ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของวัสดุเชิงประกอบยางเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก Galena เป็นสารที่มีความหนาแน่นสูง ส่งผลทำให้สามารถกำบังรังสีแกมมาได้ดี นอกจากนี้ Wimolmala (2009) ศึกษาสารทำให้เกิดฟอง 2 ชนิด คือ Oxybis (benzene sulfonyl) hydrazide, OBSH และ Azodicarbonamide, ADC ปริมาณ 0, 2, 4, 6, 8, 10 ส่วนต่อยางร้อยละ (Parts per hundred of rubber, phr) ในวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ และสารเติมแต่ง คือ ผงถั่วลอย ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ ที่ปริมาณ 40 phr พบว่า เมื่อเติมสารที่ทำให้เกิดฟองในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลของยางผสมลดลง และความหนาแน่นของยางลดลงตามปริมาณสารเนื่องจากทำให้เกิดฟองในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้น้ำหนักของวัสดุยางผสมลดลง

โดยในงานวิจัยนี้ คณะวิจัยฯ มีความสนใจศึกษาและพัฒนาวัสดุกำบังรังสีรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมา จากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ที่เดิมร่วมกับสารบิสมัทออกไซด์และสารทำให้เกิดฟอง ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติกายภาพ และสมบัติการป้องกันรังสี โดยคาดหวังว่างานวิจัยนี้ สามารถพัฒนาวัสดุสำหรับผลิตภัณฑ์ชุดกำบังรังสีของผู้ปฏิบัติงานทางรังสี ที่มีความยืดหยุ่นที่ดี สามารถโค้งงอตามรูปร่างของผู้ปฏิบัติงานได้ดี และผลิตภัณฑ์มีน้ำหนักลดลง นอกจากนี้การใช้สารบิสมัทออกไซด์เป็นสารตัวเติมมีความเป็นพิษต่อร่างกายค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับการใช้วัสดุกำบังรังสีจากสารตะกั่ว โดยวัสดุที่พัฒนาขึ้น สามารถนำไปใช้งานเป็นวัสดุกำบังรังสีที่เป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานที่มีการใช้รังสี เช่น

ศูนย์วิจัยด้านรังสี สถาบันการศึกษาต่าง ๆ และ โรงพยาบาล เป็นต้น เป็นการลดการนำเข้าวัสดุกำบังรังสีจากต่างประเทศที่มีราคาค่อนข้างสูง และเป็นการประยุกต์การใช้งานวิจัยทางด้านวัสดุศาสตร์กับงานทางด้านรังสีเพิ่มขึ้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณสารทำให้เกิดฟอง และสาร Bi_2O_3 ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และลักษณะสัณฐานวิทยา
2. เพื่อศึกษาผลของปริมาณสารทำให้เกิดฟอง และสาร Bi_2O_3 ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ที่มีต่อสมบัติการป้องกันรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมา

วิธีการวิจัย

วัสดุและสารเคมี

นํายางธรรมชาติ (เกรด STR 5L) ผสมร่วมกับสารเติมแต่ง และสารเคมีต่าง ๆ ตามสูตรดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 วัตถุดิบ สารเติมแต่งและสารเคมีของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

Ingredient	Content (phr*)	Functions
Natural rubber (STR 5L)	100 (Part)	Main matrix
ZnO	5.0	Activator
Stearic acid	3.0	Activator
Mercaptobenzothiazole; MBT	1.0	Accelerator
N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylene diamine, 6PPD	1.0	Anti-oxidant
Silica	40.0	Reinforcement
Polyethylene glycol; PEG	2.0	Activator
Paraffinic oil	10.0	Processing aid
Sulphur	2.0	Crosslinker
Bismuth oxide; Bi_2O_3	0, 100, 300, 500	X-ray & gamma protective filler
Oxybis (benzene sulfonyl) hydrazide; OBSH and Azodicarbonamide; ADC	0, 8, and 16	Blowing agent

* phr: parts per hundred parts of rubber by weight

การเตรียมวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

การผสมวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ตามสูตรในตารางที่ 1 ด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll-mill) (บริษัท Yong Fong Machinery จำกัด, ประเทศไทย) ใช้เวลาในการผสมที่ 20 นาที ใช้เวลาขึ้นรูปขึ้นงานยางจากเวลาวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ (T_{90}) ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating Disk Rheometer; ODR) (บริษัท Gotech Testing Machine จำกัด, ประเทศไทย) ขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบในแม่พิมพ์ ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน

ระบบแรงดัน (Hot compression moulding) (บริษัท LAB TECH Engineering จำกัด, ประเทศไทย) ที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส ความดัน 170 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

การทดสอบสมบัติเชิงกล ความหนาแน่น และโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

ทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ดังนี้ โมดูลัสแรงดึง (Tensile modulus) การต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และการยืดตัวที่จุดขาด (Elongation at break) ตามมาตรฐาน ASTM D412-06 ด้วยเครื่อง universal testing machine จากบริษัท Shimadzu จำกัด รุ่น Autograph AG-I 5kN ประเทศญี่ปุ่น และส่วนการทดสอบค่าความแข็ง (Hardness) ตามมาตรฐาน ASTM D2240-05 (Shore A) ด้วยเครื่อง Hardness Tester รุ่น GS-719G จากบริษัท Teclock ประเทศญี่ปุ่น ส่วนการทดสอบความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ โดยการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D792-00 (2000) และตรวจสอบลักษณะพื้นฐานวิทยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) (Nova Nano SEM 450, FEITM)

การศึกษาป้องกันรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

การทดสอบการป้องกันรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ โดยทดสอบการลดทอนรังสีเอ็กซ์ ที่กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ โดยเทียบกับตะกั่วเกรดการค้า และการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมา ที่สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.) โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาจาก โคบอลต์-60 (Co-60) การทดสอบการลดทอนรังสีแกมมา โดยเตรียมชิ้นงานขนาด 15 เซนติเมตร x 15 เซนติเมตร ตรวจนับวัดรังสีแกมมาซ้ำ 3 ครั้งต่อสูตร ใช้ชิ้นงานในการทดสอบสูตรละ 2 ชิ้น และหาค่าเฉลี่ยการลดทอนรังสีแกมมา (Gamma transmission) อุปกรณ์การทดสอบการลดทอนรังสีแกมมา แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

ผลการวิจัย

ตารางที่ 2 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ผสมบิสมัทออกไซด์ที่ปริมาณ 0, 100, 300 และ 500 phr และผสมสารทำให้เกิดฟองชนิด ADC และ OBSH ที่ปริมาณ 0, 8 และ 16 phr

Composition	Bi ₂ O ₃ content (phr)	Properties			
		100% Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (Shore A)
NR compound	0	1.3 (± 0.1)	10.5 (± 1.2)	489 (± 19)	46 (± 1)
	100	2.9 (± 0.1)	15.6 (± 0.9)	396 (± 14)	60 (± 1)
	300	3.6 (± 0.2)	10.4 (± 1.1)	296 (± 30)	69 (± 1)
	500	3.3 (± 0.2)	7.6 (± 0.8)	250 (± 17)	71 (± 1)
NR composite adding ADC 8 phr	0	1.7 (± 0.0)	9.3 (± 0.4)	333 (± 9)	32 (± 1)
	100	1.7 (± 0.0)	7.4 (± 0.5)	292 (± 10)	32 (± 2)
	300	1.4 (± 0.0)	5.4 (± 0.5)	280 (± 12)	34 (± 2)
	500	1.2 (± 0.1)	4.4 (± 0.2)	286 (± 11)	40 (± 3)
NR composite adding ADC 16 phr	0	1.4 (± 0.1)	5.3 (± 0.6)	265 (± 8)	21 (± 3)
	100	1.2 (± 0.1)	2.8 (± 0.4)	204 (± 16)	21 (± 2)
	300	1.0 (± 0.1)	3.9 (± 0.4)	282 (± 10)	25 (± 1)
	500	1.0 (± 0.1)	2.5 (± 0.2)	231 (± 8)	30 (± 2)
NR composite adding OBSH 8 phr	0	1.2 (± 0.1)	4.6 (± 0.3)	289 (± 12)	22 (± 1)
	100	1.7 (± 0.0)	8.3 (± 1.1)	324 (± 21)	34 (± 1)
	300	1.7 (± 0.2)	5.0 (± 0.6)	249 (± 16)	35 (± 1)
	500	0.9 (± 0.1)	3.4 (± 0.3)	385 (± 28)	39 (± 2)
NR composite adding OBSH 16 phr	0	1.0 (± 0.1)	3.9 (± 0.3)	306 (± 14)	19 (± 2)
	100	1.4 (± 0.0)	4.8 (± 0.7)	255 (± 16)	27 (± 2)
	300	1.2 (± 0.1)	3.3 (± 0.2)	227 (± 10)	31 (± 3)
	500	1.5 (± 0.1)	2.3 (± 0.3)	168 (± 11)	48 (± 3)

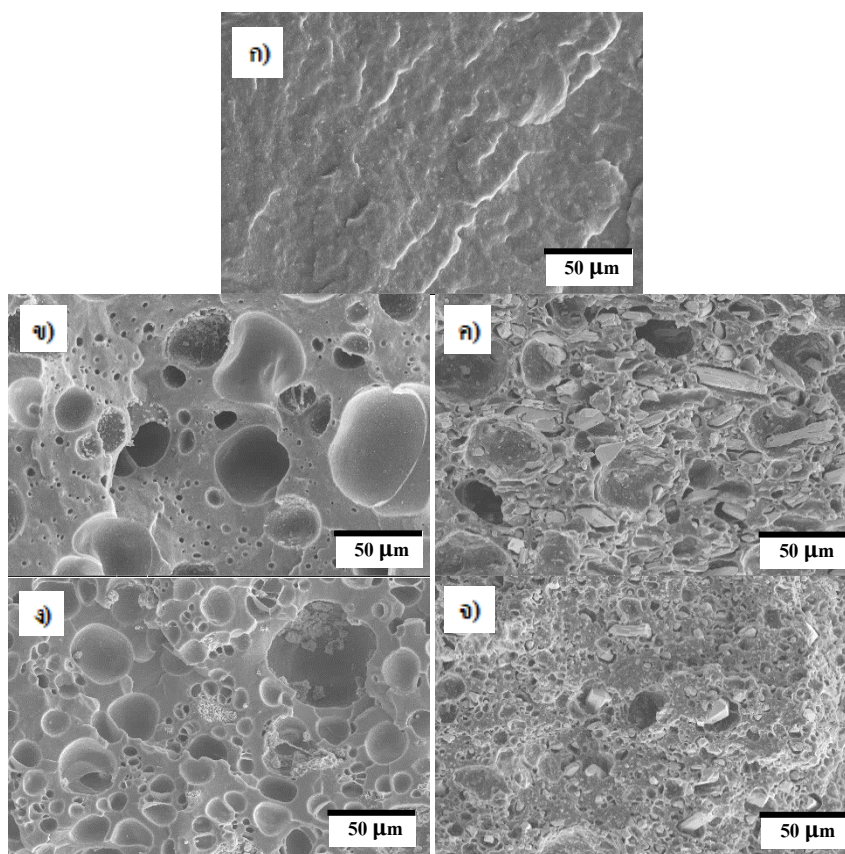
Blowing agent type: ADC: Azodicarbonamide, OBSH: Oxybis (benzene sulfonyl) hydrazide

สมบัติเชิงกลและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ผสมสารทำให้เกิดฟองและสารเติมแต่งบิสมัทออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า เมื่อเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด ADC และ OBSH ในวัสดุเชิงประกอบยางในปริมาณที่เพิ่มขึ้น (ปริมาณ 8 และ 16 phr) ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมสารทำให้เกิดฟอง นอกจากนี้พบว่า การเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด ADC ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมสูงกว่า วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH จากโครงสร้างสัณฐาน

วิทยา ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางวัสดุเชิงประกอบที่ไม่ผ่านการเติมสารทำให้เกิดฟอง (รูปที่ 2 ก) โดยพบว่าเฟสของวัสดุเชิงประกอบยางมีความต่อเนื่องและมีพื้นที่ที่สามารถรับแรงได้มาก ส่งผลทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟองทั้ง 2 ชนิด โดยวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด ADC (รูปที่ 2 ข) มีลักษณะการเกิดฟองที่มีขนาดสม่ำเสมอ และมีปริมาณการเกิดฟองที่น้อยกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH (รูปที่ 2 ง) ซึ่งวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟองทั้ง 2 ชนิด มีโครงสร้างแบบเซลล์ปิด (Close cell) ส่งผลทำให้พื้นที่ในการรับแรงของเนื้อวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด ADC มากกว่า ดังนั้นสมบัติเชิงกลโดยรวมที่สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบยางที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH

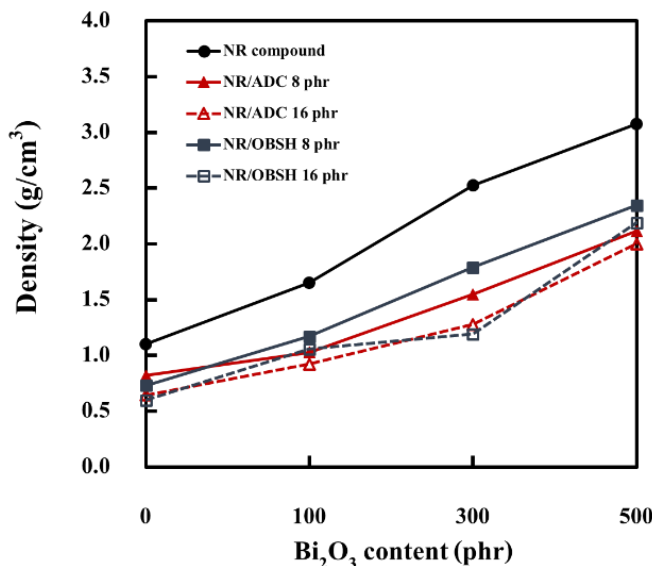
เมื่อเติมสารบิสมาทออกไซด์ ปริมาณ 100 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารทำให้เกิดฟองหรือเติมสารทำให้เกิดฟองทั้ง 2 ชนิด พบว่าการต้านต่อแรงดึง (Tensile strength) สูงขึ้น เนื่องจากบิสมาทออกไซด์เป็นสารประเภทโลหะออกไซด์ ซึ่งสามารถช่วยทำหน้าที่ในการกระตุ้นปฏิกิริยา ทำให้ยางเกิดพันธะเชื่อมขวาง (Cross-link density) เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ยางมีความแข็งแรงสูงขึ้น ส่วนวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่เติมสารตัวเติม ค่าการต้านทานต่อแรงดึงมีค่าต่ำกว่า อาจเนื่องมาจากมีปริมาณพันธะเชื่อมขวางที่ต่ำ แต่เมื่อเติมสารบิสมาทออกไซด์ในปริมาณเพิ่มขึ้นถึง 500 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่เติมสารและเติมสารทำให้เกิดฟองทั้ง 2 ชนิด พบว่าสมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบยางลดลงตามปริมาณสารบิสมาทออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลดังนี้ 1) สารบิสมาทออกไซด์ไม่สามารถเกิดอันตรกิริยากับเฟสของวัสดุเชิงประกอบยาง และ 2) มีการเติมสารตัวเติมบิสมาทออกไซด์ในปริมาณที่ค่อนข้างมากจึงเกิดการเกาะกลุ่มกันเองของสารตัวเติม (Filler - filler interaction) (Poltabtim et al., 2018) ทำให้ขัดขวางความต่อเนื่องของเฟสยางที่ลดลง (รูปที่ 2 ค และ 2 จ) ส่วนกรณีค่าความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟองทั้งชนิด ADC และ OBSH พบว่าวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ไม่เติมสารทำให้เกิดฟอง โดยที่ค่าความแข็งแรงลดลงตามปริมาณของสารทำให้เกิดฟองเนื่องจากเนื้อของวัสดุยางมีฟองอากาศในเนื้อของวัสดุมากขึ้น จึงส่งผลทำให้พื้นที่ของเนื้อยางในการรับแรงต้านต่อการกดลดลง และเมื่อเติมสารบิสมาทออกไซด์ร่วมกับสารทำให้เกิดฟองในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ พบว่า ค่าความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารบิสมาทออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารบิสมาทออกไซด์ เป็นวัสดุที่มีลักษณะแข็งเกร็ง (Rigidity) จึงทำให้ค่าความแข็งแรงที่ผิวของวัสดุเชิงประกอบโดยรวมเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาเทคนิค SEM ดังนี้ ก) วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ข) เดิมสารทำให้เกิดฟอง ADC ที่ 8 phr ค) เดิมสารทำให้เกิดฟอง ADC ร่วมกับ Bi_2O_3 ที่ 500 phr ง) เดิมสารทำให้เกิดฟอง OBSH ที่ 8 phr และ จ) เดิมสารทำให้เกิดฟอง OBSH ร่วมกับ Bi_2O_3 ที่ 500 phr

ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

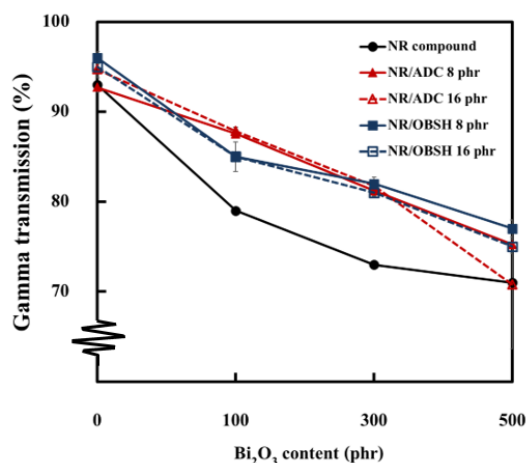
เมื่อตรวจสอบค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารทำให้เกิดฟอง มีค่าความหนาแน่น (น้ำหนัก) ที่มากกว่าวัสดุเชิงประกอบยางที่เติมสารทำให้เกิดฟองทั้ง 2 ชนิด ทั้งนี้เนื่องจากอากาศเข้าไปแทนที่เนื้อวัสดุยาง ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางมีน้ำหนักลดลงตามปริมาณการเติมสารทำให้เกิดฟองที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีการเติมสารบิสมัทออกไซด์ร่วมกับสารทำให้เกิดฟองในวัสดุเชิงประกอบยาง พบว่า ค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น (น้ำหนักมากขึ้น) ตามปริมาณการเติมสารบิสมัทออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากว่าสารบิสมัทออกไซด์เป็นสารที่มีค่าความหนาแน่น (9.8 g/cm^3) ที่สูงกว่าวัสดุยางธรรมชาติ (0.9 g/cm^3) ส่งผลทำให้ความหนาแน่นโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเติมสารบิสมัทออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น



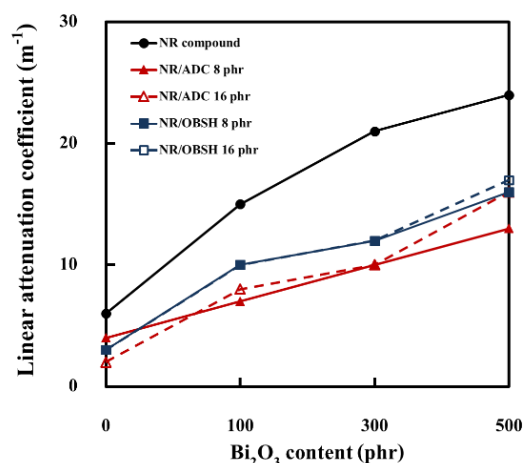
รูปที่ 3 ค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการผสมสารบิสมัทออกไซด์ที่ปริมาณ 0, 100, 300 และ 500 phr ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด ADC และ OBSH ที่ปริมาณ 0, 8 และ 16 phr

สมบัติการป้องกันรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

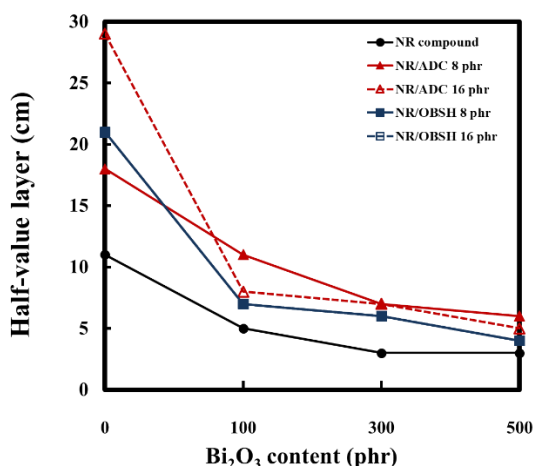
จากผลการทดสอบค่าอัตราส่วนการทะลุผ่านของรังสีแกมมา (Gamma transmission) ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient, μ) และค่าความหนาที่ให้ความเข้มของรังสีลดลงครึ่งหนึ่ง (Half value layer) ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า เมื่อมีการเติมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีอัตราส่วนการทะลุผ่านของรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมสารทำให้เกิดฟอง พบว่า ยางธรรมชาติที่ไม่เติมสารทำให้เกิดฟองมีความสามารถในการลดทอนการทะลุผ่านรังสีได้ดีกว่ายางที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟอง เนื่องจากยางธรรมชาติที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟอง ส่งผลทำให้เนื้อยางมีความเป็นรูพรุนมาก ความหนาแน่นน้อย ซึ่งทำให้ง่ายต่อการทะลุผ่านรังสีได้ง่าย แต่เมื่อมีการเติมสารบิสมัทออกไซด์ ส่งผลให้มีอัตราส่วนการทะลุผ่านของรังสีแกมมาลดลงตามปริมาณของสารบิสมัทออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่เติมบิสมัทออกไซด์ พบว่า ยางธรรมชาติที่ไม่เติมบิสมัทออกไซด์มีความสามารถในการยับยั้งการทะลุผ่านรังสีแกมมาได้ต่ำกว่า เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่มีการเติมสารบิสมัทออกไซด์ (รูปที่ 4ก) ซึ่งค่าอัตราส่วนการทะลุผ่านของรังสีแกมมา เป็นค่าแปรผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้น ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารบิสมัทออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4ข) เนื่องจากการเติมสารบิสมัทออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ง่ายต่อการเกิดอันตรกิริยา และเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้กับนิวเคลียสของบิสมัทได้มากขึ้น ส่งผลให้ความเข้มของรังสีแกมมาที่ผ่านชิ้นงาน มีค่าลดลง ทั้งนี้ในส่วนของคุณค่าความหนาที่ให้ความเข้มของรังสีลดลงครึ่งหนึ่ง (รูปที่ 4 ค) พบว่า เมื่อเติมปริมาณสารทำให้เกิดฟองในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ทำให้ต้องใช้วัสดุที่มีความหนาเพิ่มขึ้น จึงสามารถลดทอนปริมาณรังสีได้ครึ่งหนึ่ง แต่เมื่อเติมสารบิสมัทออกไซด์ร่วมกับสารทำให้เกิดฟองในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น พบว่าค่าความหนาที่ให้ความเข้มของรังสีลดลงครึ่งหนึ่งมีค่าลดลงตามปริมาณสารบิสมัทออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการที่บิสมัทออกไซด์มีกลไกในการยับยั้งการทะลุผ่านของรังสีแกมมาได้ดี (Poltabtim et al., 2018)



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4 ผลการบ่งชี้รังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมบิสฟีนอล A ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด ADC และ OBSH โดยที่ ก) เปอร์เซ็นต์การทะลุผ่านวัสดุของรังสีแกมมา ข) การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้น ค) ความหนาของวัสดุที่สามารถลดทอนปริมาณรังสี 50 เปอร์เซ็นต์

ส่วนผลการทดลองในตารางที่ 3 แสดงค่าการลดทอนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟองที่ปริมาณ 8 phr ร่วมกับสารบิสฟีนอล A ที่ปริมาณ 0 และ 500 phr โดยที่ความหนา 3 มิลลิเมตร พบว่า วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิดที่ปริมาณ 8 phr แต่ไม่มีการเติมสารบิสฟีนอล A ส่งผลทำให้วัสดุสามารถลดทอนปริมาณรังสีได้น้อยที่สุด ซึ่งสามารถลดทอนปริมาณรังสีเอ็กซ์ได้เทียบเท่ากับแผ่นตะกั่วหนา 0.01 มม. เท่านั้น แต่เมื่อมีการเติมสารบิสฟีนอล A ที่ปริมาณ 500 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟอง ชนิด ADC และ OBSH พบว่า วัสดุสามารถลดทอนปริมาณรังสีเอ็กซ์ได้ถึง 73.48% และ 74.97% ซึ่งเทียบเท่ากับแผ่นตะกั่วหนา 0.32 และ 0.34 มม. ตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถการลดทอนรังสีเอ็กซ์ระหว่างสารทำให้เกิดฟองทั้ง 2 ชนิด พบว่ามีความสามารถในการลดทอนรังสีเอ็กซ์ไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 3 การลดทอนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ที่ความหนา 3 มม.

NR compound	Bi ₂ O ₃ content (phr)	X-ray attenuation (%)	Equivalent to standard Lead (mm)
With ADC (8 phr)	0	4.08 (±2.0)	0.01
	500	73.48 (±2.0)	0.32
With OBSH (8 phr)	0	4.05 (±2.0)	0.01
	500	74.97 (±2.0)	0.34

สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด ADC และ OBSH และสารบิสมัทออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมลดลงตามปริมาณสารทำให้เกิดฟองที่เพิ่มขึ้น แต่ค่าความหนาแน่น และความสามารถในการลดทอนรังสีของวัสดุเชิงประกอบยางลดลง

2. เมื่อมีการเติมสารบิสมัทออกไซด์ปริมาณเพิ่มขึ้นในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุลดลง และวัสดุเชิงประกอบยางมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารบิสมัทออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่วัสดุเชิงประกอบยางสามารถลดทอนรังสีเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารบิสมัทออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณการสนับสนุนทุนการวิจัยจากมูลนิธิ โทร เพื่อการส่งเสริมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย (TTSF) และโครงการวิจัยมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (NRU) มจร. สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.) สำหรับความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือทดสอบรังสีแกมมา และบริษัท เอ.เอฟ.ซูเปอร์เซลล์ จำกัด ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี

เอกสารอ้างอิง

- นคร ไพศาลกิตติสกุล, ฟิสิกส์เชิงรังสี (Radiological Physics). กรุงเทพฯ: บริษัท อักษรโสภณ จำกัด; 2555.
- นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ. วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์. กรุงเทพฯ: ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2545.
- Gwaily S E. Galena / (NR+SBR) rubber composites as gamma radiation shields. Polym Test 2002; 21: 883-887.
- Poltabt W, Wimolmala E, Saenboonruang K. Properties of lead-free gamma-ray shielding materials from metal oxide/ EPDM rubber composites. Radiat Phys Chem 2018; 153: 1-9.
- Wimolmala E, Khongnual K Sombatsompop N. 2009, Mechanical and morphological properties of cellular NR/SBR Vulcanizates under thermal and weathering ageing. J Appl Polym Sci 2009; 114(5): 2816-2827.